



Disk fragmentation and intermittent accretion growth of protostars in the early universe

著者	Matsukoba Ryoki
number	92
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3329号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00131728

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	松木場 亮喜	提出年	令和 3 年
学位論文の 題 目	Disk fragmentation and intermittent accretion growth of protostars in the early universe (宇宙初期における星周円盤の分裂と原始星の間欠的な降着成長)		

論文目次

1. Summary of supermassive black holes formation in the early universe	
1.1 Supermassive black holes	
1.2 Observations of high-redshift QSOs	
1.3 Accretion growth of seed black holes	
1.4 Black holes as Pop III star remnant	
1.4.1 Gravitational collapse of primordial gas cloud	
1.4.2 Accretion phase of Pop III star formation	
1.4.3 Fate of Pop III stars	
1.5 Direct collapse	
1.5.1 Thermal evolution of collapse phase in SMS formation	
1.5.2 Stellar evolution under the rapid gas accretion	
1.6 Runaway collision in dense star clusters	
1.7 Advantages of direct collapse scenario	
1.8 Motivation of this thesis	
1.8.1 Disk fragmentation in SMS formation	
1.8.2 SMS formation form metal-enriched gas cloud	
1.8.3 Aims of this thesis	
2. Intermittent accretion in SMS formation	
2.1 Overview	
2.2 Method	
2.2.1 Hydrodynamic simulations	
2.2.2 Thermal processes	
2.2.3 Chemical reactions	
2.2.4 Initial conditions	
2.3 Result	
2.3.1 Time evolution of the gravitationally unstable disk	
2.3.2 Stellar evolution under intermittent accretion	
2.3.3 Comparison with the calculation using a barotropic relation	

2.4 Summary of this chapter and related discussion	
3. Protostellar-disk fragmentation in low-metallicity environments	
3.1 Overview	
3.2 Method	
3.2.1 Thermal model	
3.2.2 Chemical reactions	
3.2.3 Initial conditions	
3.3 Result	
3.3.1 Disk and envelope structures	
3.3.2 Clump properties	
3.4 Summary of this chapter and related discussion	
4. Conclusion	
4.1 Summary	
4.2 Conjecture on SMS formation from slightly metal-enriched gas	
4.3 Future prospects	
References	
Appendix A: Continuum cooling rate in the optically thick regime	
Appendix B: Chemical reactions	
Appendix C: Optical depth for line emission	

論文概要

More than 200 supermassive black holes (SMBHs) with $>10^7$ solar masses have been discovered by recent observations within 1 Gyr after the Big Bang. Although standard formation scenario explaining the origin of these BHs has not yet been established, massive seed BHs are preferred because the existence of the high-redshift SMBHs suggests that they had grown to SMBHs in a short period.

In this thesis, we focus on supermassive stars (SMSs) with mass of $\sim 10^5$ solar masses as an origin of the observed SMBHs in the early universe. Primordial clouds irradiated by strong far-ultraviolet radiation from their nearby galaxies are suitable formation sites of SMSs. In such clouds, very rapid accretion onto protostars is realized because of high gas temperature (about 8000 K). Under the rapid gas accretion, the protostar inflates in radius, and hence the effective temperature is kept at about 5000 K. The accretion rate must be higher than the critical value of 0.04 solar mass per year to maintain the inflating stellar surface. Once the accretion rate drops below the critical value, the stellar surface shrinks and the effective temperature may become high enough to emit ionizing photons.

The circumstellar disk fragmentation causes intermittent accretion. If the quiescent period of the intermittent accretion, which is defined as the time duration for which the accretion rate is below the critical value, is longer than the Kelvin-Helmholtz (KH) timescale at the stellar surface, ionizing radiation from the protostar becomes strong enough to suppress the accretion.

In order to examine the role of the ionizing feedback, we first perform vertically-integrated two-dimensional hydrodynamic simulations of two possible SMS-forming clouds extracted from cosmological simulations to follow circumstellar disk evolution. We find that although the accretion becomes intermittent due to the formation of spiral arms and clumps in gravitationally unstable disks, the quiescent periods are always shorter than the KH time-scales, implying that SMS can form without being affected by the ionizing feedback.

Although SMSs are thought to form from primordial gas clouds as described above, a new channel for SMS formation in slightly metal-enriched gas clouds is recently proposed. Although dust cooling induces the fragmentation and produces a few thousand low-mass stars, the accretion flow selectively falls onto a star located at the cloud center. The disk fragmentation may occur and cause the intermittent accretion also in this case. The properties of the metal-poor circumstellar disks, however, are still not well understood in the case not only of the SMS formation but also of the ordinary-mass star formation.

Next, we carry out hydrodynamic simulations of ordinary-mass star formation with various metallicities in order to investigate the properties of metal-poor disks, i.e., gravitational stability, thermal processes, and accretion rate, for future understanding of the SMS formation in a slightly metal-enriched cloud. In all the models except 1 solar metallicity case, a number of clumps are formed by the disk fragmentation and cause the intermittent accretion. We find characteristic accretion histories in two metallicity regimes. In the metallicity range from 10^{-4} to 10^{-3} solar metallicities, the gas temperature suddenly increases by molecular hydrogen formation heating, resulting in temporary suppression of accretion for about 5000 yr. In extremely low-metallicity cases ($\leq 10^{-6}$ solar metallicities), one of the clumps grows to a similar mass to the central star and makes a binary system. Since the infalling gas accretes to the clumps rather than the central star, the accretion rate onto the central star becomes two orders of magnitude smaller.

Judging from the results of two calculations, we infer that SMSs are successfully formed without the effect of intermittent accretion if the metallicity is $\leq 10^{-5}$ solar metallicities. On the other hand, if the metallicity is $\sim 10^{-4}$ solar metallicity, the intermittent accretion due to the molecular hydrogen formation heating may results in the ionizing feedback terminating the stellar mass growth before reaching the SMS regime ($\geq 10^5$ solar masses).

論文審査の結果の要旨

巨大ブラックホールは銀河中心に普遍的に存在する宇宙の基本的な構成要素の一つであり、その質量は母銀河の性質とよく相関しているという事実から、初期の宇宙において誕生したのち銀河と共に進化、成長して来たものと思われる。しかしながら、その起源はいまだ不明であり、その解明は現代天文学の最大の課題の一つとなっている。

その解明に向けて、松木場亮喜氏は直接崩壊という巨大ブラックホール形成過程として、現在、有力視されているシナリオに着目して研究をおこなった。このシナリオでは太陽の 10 万倍程度の超大質量星が同程度の質量の種ブラックホールへと重力崩壊することが想定されているが、そのような超大質量星の形成は、周囲のガスが原始星に対して $1/100$ 太陽質量毎年程度の高い降着率で落下し続ける場合に可能であると考えられている。高降着率下の原始星は、半径が膨張し表面温度が低く保たれることで、ガス降着の妨げとなる電離フィードバックが抑えられ、原始星は超大質量星まで成長するというシナリオである。しかしながら、松木場氏は修士論文において、原始星へガスを供給する周囲の降着円盤が、自己重力不安定性により分裂する可能性を指摘した。その場合、原始星への降着は間欠的になると考えられるが、その際の降着率が低くなる静穏期が十分長いと、原始星が収縮して表面温度が上昇し、電離光子を放出する等のフィードバックにより、星の成長を止めてしまうので、超大質量星が形成されなくなる。そこで松木場氏は博士課程において、間欠的な降着が実現するのか、また静穏期と星の収縮のタイムスケールの関係はどうなるのかを解明するため、高い降着率で成長する原始星の星周円盤の進化を、2 次元の数値流体シミュレーションを実行することで解析した。その結果、円盤分裂によって間欠的な降着となるものの、その静穏期は常に収縮のタイムスケールよりも短いことが明らかとなった。これは高い降着率が維持された場合、原始星は電離フィードバックの影響を受けずに超大質量星へと成長可能であることが示し、直接崩壊シナリオにより種ブラックホールが形成可能であることを示唆する重要な成果である。

さらに、従来は、超大質量星は炭素や酸素などの重元素を含まない始原ガスからのみ形成可能であるものと考えられてきたが、近年、わずかに重元素を含んだ場合にも超大質量の形成が可能であることが指摘されている。この場合においても、円盤分裂による間欠的な降着は、超大質量星形成の妨げとなりうるため、その効果を調べることが望まれる。しかしながら、現在のところ低重元素量環境下における星周円盤の性質は、超大質量星のみならず通常の星形成の場合においても理解があまり進んでいない。そこで松木場氏は、将来的な超大質量星形成の研究への第一段階として、まずは通常の質量の星形成における、円盤不安定性の重元素量依存性を 2 次元の数値流体シミュレーションによって調べた。その結果、太陽よりも重元素が低い環境においては星周円盤は重力的により不安定であり、分裂が起きやすいことがわかった。分裂によってできたガス塊が中心星へと落下することで、降着は間欠的になることが示された。またガス塊の質量を調べたところ、太陽質量よりも小さいものが多数存在することも明らかとなった。これらがその後、質量をあまり増加させない場合、銀河ハロー中に観測されている低質量星の起源となりうることを示唆する重要な結果である。

これら、一連の研究は、初期宇宙の星形成における円盤の役割に着目し、星形成環境と形成される星の性質の関連の理解につながる重要な知見を与えたと評価される。以上は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、松木場亮喜氏提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。